водных систем любой сложности.

1.Самойленко Н.И., Сенчук Т.С. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем. – Харьков: НТМТ, ХНАГХ, 2009. – 276 с.
2.Ильин Ю.А. Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
3.Коваленко И.Н. Исследования по анализу надежности сложных систем. – К.: Наук. думка, 1976. – 211 с.
4.Коваленко И.Н., Кузнецов И.Ю. Методы расчета высоконадежных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
5.Петросов В.А. Управление региональными системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1999. – 320 с.

*Получено 23.04.2010*

УДК 656.02 : 338.47

И.А.ГАВРИЛЕНКО, Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## УПРОЩЕННЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРОВЕРКЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются вопросы устойчивости функционирования городских трубопроводных систем. Проведен упрощенный вычислительный эксперимент по проверке адекватности математических моделей устойчивости функционирования магистральных трубопроводных систем.

Розглядаються проблеми стійкості функціонування міських трубопровідних систем. Проведено спрощений обчислювальний експеримент з перевірки адекватності математичних моделей стійкості функціонування магістральних трубопровідних систем.

The article is devoted to the problems of stability of operation of municipal pipe-line networks. The simplified computing experiment concerning the test of adequacy of mathematical models of stability of operation of main pipe-line networks has been organized.

*Ключевые слова:* трубопроводная система, устойчивость функционирования, целевой продукт, магистральная трубопроводная сеть, функциональная надежность, вычислительный эксперимент.

Модели устойчивости функционирования городских трубопроводных систем, получаемые с помощью аналитического метода построения математических моделей для расчета вероятности бесперебойной поставки целевого продукта (ЦП) потребителям, должны быть проверены на адекватность. Доказательство адекватности моделей устойчивости функционирования трубопроводных систем подтверждает правомерность разработанного в [1] аналитического метода и свидетельствует о безошибочности проведения многоэтапной процедуры построения данных моделей. Проверка адекватности основывается на статистических методах, которые позволяют непосредственно оценить тот или иной показатель надёжности системы, и представляет собой достаточно трудоёмкий процесс, особенно для систем со сложной структурой и многокомпонентным составом. При этом проверка считается успешной, если значение показателя, рассчитанное по аналитической модели, попадает в доверительный интервал значений, построенный методами статистического моделирования.

Анализ исследований по рассматриваемой проблеме позволил определить различные подходы к проверке адекватности моделей для трубопроводных систем с разными структурами [2, 3]. При различных структурах системы алгоритмы, определяющие зависимость устойчивости поставки ЦП разным потребителям от отказа в системе, также различны. Автоматизированная генерация программы, реализующей такой алгоритм для произвольной системы, является сложной. Разработанная универсальная последовательность процедур позволяет проверять адекватность математических моделей функциональной надёжности систем с произвольной структурой и составом трубопроводных сетей [4]. Организация вычислительного эксперимента по проверке адекватности моделей устойчивости функционирования трубопроводных систем требует больших временных затрат. С целью снижения трудоемкости проведения эксперимента следует выбирать в качестве тестовых магистральные системы с простейшими структурами, схемы трубопроводных сетей которых приведены на рис.1-3. При этом ограничимся условием, что вероятность выхода из строя любой задвижки трубопроводной сети в течение расчётного периода $T$ равна нулю.

Целью работы является проведение упрощенного вычислительного эксперимента по проверке адекватности моделей устойчивости функционирования трубопроводных систем.

Трубопроводные сети магистральных систем, приведенные на рис.1-3, имеют одинаковые магистральные трубопроводные участки $t_i \left( i = \overline{1,4} \right)$. Системы отличаются друг от друга только количеством задвижек на центральной трубе перемычки.

Пусть трубопроводные участки $t_i \left( i = \overline{1,4} \right)$ всех систем имеют равные параметры, а именно: длина $l_i = 100$ км; интенсивность отказов $\lambda = 0{,}1$ км$^{-1}$ год$^{-1}$; интенсивность восстановления $\mu = 365$ год$^{-1}$. Пусть также вероятность безотказной работы любой задвижки равна единице. Поскольку длины центральной трубы перемычки и труб, соединяющих напорные агрегаты (источники) с ближайшими задвижками, на несколько порядков меньше длины любого трубопроводного участка сети, то принимаем длины первых равными нулю.

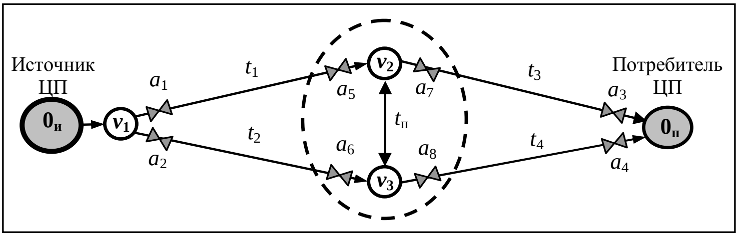


Рис. 1 – Граф-схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с четырьмя задвижками

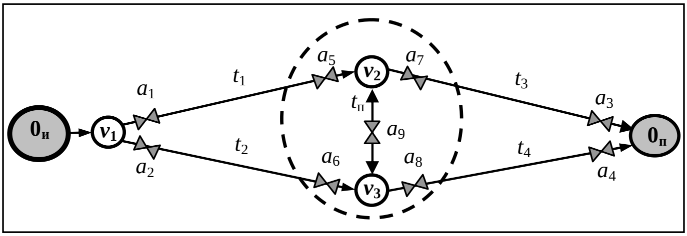


Рис. 2 – Граф-схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с пятью задвижками

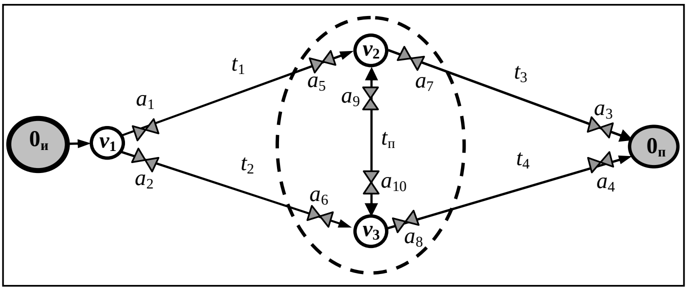


Рис. 3 – Граф-схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с шестью задвижками

Таким образом, все элементы систем на рис.1-3, кроме трубопроводных участков $t_i \left( i = \overline{1,4} \right)$, являются абсолютно надёжными. При таком допущении все три системы будут иметь одинаковую математическую модель функциональной надёжности

$$P^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2, \tag{1}$$

где $p$ – вероятность безотказной работы трубопровода, длиной $l$ в два раза больше любого из участков $t_i$ $\left( i \in \{\overline{1,4}\} \right)$, т.е. $l$ = 200 км.

При заданных исходных данных $p = 1 - \dfrac{l\lambda}{\mu} = 1 - \dfrac{200 \cdot 0{,}1}{365} =$ $= 0{,}9452$. При этом функциональная надёжность, согласно математической модели (1), $P^f = 0{,}9985$.

Промежуточным результатом в процессе получения модели (1) является расчётная графическая модель, приведенная на рис.4. В модели отсутствуют блоки, соответствующие задвижкам и аварийно-ремонтным зонам (АРЗ) с абсолютной надёжностью. Блоки с вероятностями $p_i$ $\left( i \in \{\overline{1,4}\} \right)$ соответствуют одноимённым АРЗ рассматриваемых систем.

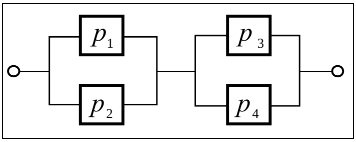


Рис. 4 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой

Докажем адекватность модели (1) с помощью упрощенного вычислительного эксперимента.

Для проведения упрощённого эксперимента все трубопроводные участки сети располагаются в одну координатную линию (рис.5) и формируется массив $G$ (табл.1).

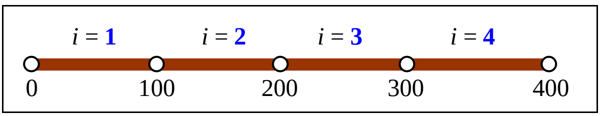


Рис.5 – Координатная линия для трубопроводных участков

Затем определяется общее число $n$ отказов трубопроводных участков в течение расчётного периода времени $T$

$$n = \mathrm{int}\left( \lambda \sum_{i=1}^{Card\ \boldsymbol{E}} l(t_i) + 0{,}5 \right). \tag{2}$$

Таблица 1 – Элементы массива $G$

| $r$ \ $j$ | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 6 |
| 2 | 100 | 200 | 300 | 400 |

При заданных исходных данных

$$n = \mathrm{int}\left(0{,}1\sum_{i=1}^{4} l(t_i) + 0{,}5\right) = 40. \qquad (3)$$

Далее определяются параметры отказов трубопроводных участков и формируется массив параметров отказов М (табл.2).

Таблица 2 – Значения параметров отказов трубопроводов (массив М)

| **Индекс параметра *r*** | **Параметр** | **Индекс отказа *k*** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **1** | **2** | **…** | **40** |
| 1 | Индекс места | $f_1$ | $f_2$ | … | $f_{40}$ |
| 2 | Время наступления | $\tilde{t}_1$ | $\tilde{t}_2$ | … | $\tilde{t}_{40}$ |

В табл.2 значение параметра $f_k\left(k = \overline{1,40}\right)$ определяется с помощью рекурсивной функции

$$f_k(j,x) = \begin{cases} g_{1j}, & \text{если} \quad x < g_{2j}; \\ f_k(j+1,x), & \text{если} \quad x \ge g_{2j}, \end{cases} \qquad (4)$$

где $j, x$ – параметры рекурсивной функции**;** $g_{\kappa j}$ – элементы массива $G^2$.

При каждом обращении к функции (4) ее целочисленный параметр $j$ всегда равен 1, а параметр $x$ есть действительное число, определяемое выражением

$$x = l \cdot \tilde{x} = 400 \cdot \tilde{x}. \qquad (5)$$

Здесь $l$ – общая протяженность всех трубопроводов сети; $\tilde{x}$ – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1.

Случайное значение параметра $\tilde{t}_k\left(k = \overline{1,40}\right)$ определяется по формуле

$$\tilde{t}_k = \mathrm{int}(365 \cdot \tilde{x}), \quad k = \overline{1,n_\Sigma}, \qquad (6)$$

где $\tilde{x}$ – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1; $n_{\Sigma} = \sum_{g=1}^{J_1} n_g$ – суммарное число отказов на трубопроводных участках в системе; int (.) – оператор взятия целой части числа; 365 – коэффициент преобразования единицы измерения времени *год* в *сутки*.

Результатом выполнения последней процедуры является случайное значение показателя функциональной надёжности $\tilde{P}^f$.

В соответствии с последней процедурой *n*-кратное выполнение всей последовательности процедур по определению показателя $\tilde{P}^f$ и вычислению его среднего значения $P^f_{\text{ср.}}$ по формуле (7) позволяет увидеть тенденцию изменения $P^f_{\text{ср.}}$ в зависимости от $n$

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tilde{P}_i^f = P^f, \qquad (7)$$

где $n$ – достаточно большое количество экспериментов по проверке адекватности модели; $\tilde{P}_i^f$ – значение показателя функциональной надёжности при *i*-м эксперименте; $P^f$ – истинное (адекватное) значение показателя функциональной надёжности.

Результаты вычислительного эксперимента по изложенной упрощённой методике представлены в виде диаграммы на рис.6.

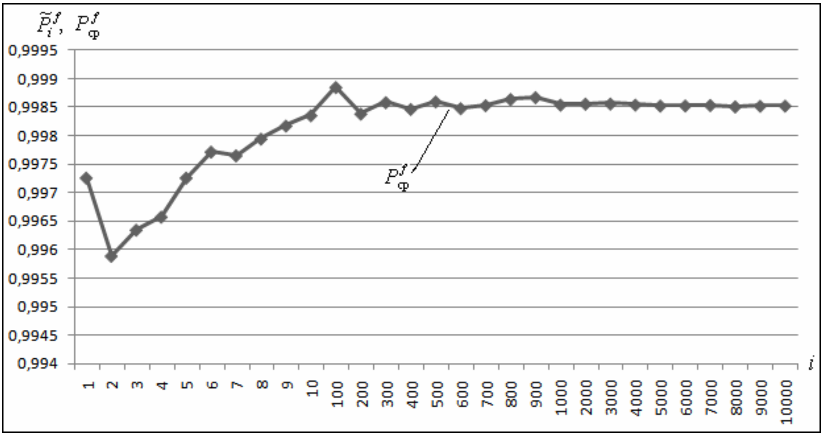


Рис.6 – Диаграмма $P^f_{\text{ср.}}$ в зависимости от количества экспериментов *i*

Анализ диаграммы, приведенной на рис.6, показывает, что с ростом числа экспериментов $n$ среднее значение надёжности $P^f_{\text{ср.}}$ неуклонно стремится к значению $P^f = 0{,}9985$, полученному с помощью математической модели (1). Следовательно, адекватность модели (1) доказана.

1.Гавриленко И.А., Самойленко Н.И. Метод расчета функциональной надежности трубопроводных транспортных систем // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.81. – К.: Техніка, 2008. – С.176-183.

2.Беляев Ю.К. Статистические методы в теории надежности. – М.: Знание, 1978. – 66 с.

3.Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 328 с.

4.Адекватность моделей функциональной надежности трубопроводных систем / Н.И.Самойленко, А.Б.Костенко, Т.С.Сенчук, И.А.Гавриленко, А.В.Лобан; Под ред. Н.И.Самойленко. – Харьков: НТМТ, 2009. – 115 с.

*Получено 19.04.2010*

УДК 658

Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук, Т.С.СЕНЧУК
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## АДЕКВАТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ГОРОДСКИХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Рассматриваются вопросы организации и проведения вычислительного эксперимента по проверке адекватности метода аварийно-ремонтных зон и математических моделей, построенных с его помощью.

Розглядаються питання організації та проведення обчислювального експерименту по перевірці адекватності методу аварійно-ремонтних зон і математичних моделей, побудованих за його допомогою.

In the given paper questions of the organization and carrying out of calculation experiment on check of adequacy of a method of zones of breakdown and repair and the mathematical models constructed with its help are considered.

*Ключевые слова*: функциональная надежность, метод аварийно-ремонтных зон, перемычка, задвижка, магистральная трубопроводная транспортная система.

При проектировании городских трубопроводных сетей с учётом показателей функциональной надёжности (ФН) необходимо иметь математические модели, которые адекватно отражают эти показатели в зависимости от структуры и состава сети.

Существующие подходы к проблеме расчета ПФН трубопровода освещаются в работах [1-3]. Анализ этих и других источников по данной тематике свидетельствует, что существующие методы расчёта на-